

AP01 - Medición del porcentaje de madurez en ramas de café mediante dispositivos móviles y visión por computador

Ramos, P.^{1,2}; Prieto, F.², Oliveros, C.¹, Aleixos, N.³, Albert, F.³, Blasco, J.⁴

¹ Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, km 4 vía antigua Chinchina – Manizales, Colombia. Email: {paula.ramos, carlos.oliveros}@cafedecolombia.com.

² Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Carrera. 45 # 26-85, Bogotá D.C., Colombia. Email: faprieto@unal.edu.co.

³ Instituto Labhuman. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España. Email: {fraalgi1, naleixos}@dig.upv.es

⁴ Centro de Agroingeniería. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Crta. Moncada-Náquera km 5, 46113 Moncada (Valencia), España. Email: blasco_josiva@gva.es

Resumen

Actualmente, la cosecha de café en Colombia se realiza de manera manual, tiene un alto requerimiento de mano de obra y es responsable del 40% de los costos de producción. Para determinar las necesidades de mano de obra, los productores realizan estimaciones de la producción mediante métodos destructivos o subjetivos. Este trabajo investiga el desarrollo de una estrategia, basada en el análisis de imágenes, para planificar la cosecha del café a través de la estimación no destructiva del porcentaje de frutos maduros (PM) en las ramas. Para la puesta a punto de la metodología, se adquirieron imágenes utilizando un teléfono móvil en diferentes condiciones de campo a un total de 69 ramas de café variedad Castillo®, con un PM entre el 10% y el 70%. Debido a la longitud de las ramas (entre 40 y 60 cm), se capturaron varias imágenes de cada rama, obteniendo un total de 280 imágenes. Para segmentar las imágenes se utilizó la aplicación Food-ColorInspector (<http://www.cofilab.com>) y para cada rama se obtuvo mediante esta aplicación el área correspondiente a tres estados de madurez de los frutos (inmaduro, semimaduro y maduro), que se asoció al PM. Adicionalmente, se realizó el conteo manual de los frutos en los distintos estados de maduración. Se utilizaron 23 ramas escogidas al azar para crear un modelo lineal de estimación entre los porcentajes de madurez obtenidos mediante el análisis de las imágenes y el análisis manual. El modelo obtuvo un coeficiente de determinación $R^2=88\%$, con un error promedio absoluto del 3,9% entre el PM estimado a mano y mediante análisis de imagen. Posteriormente, este modelo se validó con 46 ramas restantes, obteniendo un $R^2=75\%$ y un error promedio de 5,5%. Los resultados son prometedores para la creación de herramientas que automaticen la actual estimación manual de cosecha del café mediante el uso de dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes, al alcance de cualquier caficultor.

Palabras clave: Caficultura, planeación de cosecha, análisis de imágenes, agricultura de precisión.

Measuring the percentage of maturity on coffee branches using mobile devices and computer vision

Abstract

Nowadays the harvesting of coffee in Colombia is done manually, has a high demand for labour and is responsible for 40% of production costs. To provide hiring staff, producers make destructive or subjective estimations of the yield production. This work aims to generate an automatic strategy for planning the coffee harvest through nondestructive estimation of the percentage of mature fruits (PM) by means of image analysis. Images of 69 coffee branches of Castillo® variety were acquired using a mobile phone in different field conditions, having a real PM between 10% and 70%. Due to the high length of the branches (40 to 60 cm), multiple images along each branch were captured, obtaining a total of 280 images. The Food-ColorInspector application (<http://www.cofilab.com>) was used to segment the images, and the area corresponding to three stages of maturity of fruits (immature, half-ripe and full-ripe) was obtained for each branch. Additionally, manual counting of the fruits at different ripening stages was performed. A total of 23 branches were used to create a linear model using the percentages of maturity obtained by image analysis and manual analysis. The model obtained a coefficient of

determination $R^2=88\%$, with an absolute average error of 3.9% between the PM estimated by hand and by image analysis. Subsequently, this model was validated with the remaining 46 branches, obtaining a $R^2=75\%$ and an average error of 5.5%. The results are promising to create tools to automate current manual yield prediction of coffee by using mobile devices such as smartphones, available to any farmer

Keywords: Coffee cultivation, harvest planning, image analysis, precision agriculture.

Introducción

La productividad de un cultivo se mide como la masa por unidad de área que es producida en un rango de tiempo determinado, es un indicador estimado a través de diferentes modelos basados en históricos de producción, modelos econométricos, modelos de la dinámica climática, deficiencia o exceso de un elemento químico, características del suelo, incidencia de plagas o enfermedades y fenología de la planta. La productividad de un cultivo es un dato estratégico para el gobierno, las empresas agroindustriales, los agricultores y los comercializadores, ya que se puede emplear en el planteamiento de políticas de seguridad alimentaria, políticas para disminuir el riesgo económico de producción por déficit/exceso del producto, planeación de labores en la finca como cosecha y poscosecha, etc.

Para el caso del café de Colombia, entes gubernamentales definen estrategias nacionales a partir de métodos econométricos (Martínez 2006). Otros autores, como por ejemplo, Rendón et al. (2008) o Arcila et al. (2007), han definido modelos basados en variables de tipo fenológico basados en estructuras vegetativas del árbol estrechamente ligadas con la producción, como flores, frutos, glomérulos y ramas. Por otro lado, Cilas y Descroix (2004) y Upreti et al. (1991) han utilizado modelos para estimar la producción de café en función de variables endógenas, como los diferentes componentes de la producción de la planta, es decir, el número de tallos por planta, el número de racimos por rama, el número de frutos por racimo, y el número de de racimos por planta. Cilas y Descroix (2004) estimaron el número de frutos por planta utilizando la Ecuación 1

$$\overline{F} = s_t \cdot b_s \cdot g_b \cdot f_g \quad (1)$$

donde S_t es el número de tallos por árbol, b_s es el número de ramas por tallo, g_b es el número de glomérulos por rama y f_g es el número de frutos por glomérulo. Adicionalmente, reportaron métodos estratificados para diferentes áreas, alturas, suelos, relaciones área/suelo y área/altitud, con error de estimación inferior al 3,19%.

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FEDECAFÉ) realiza actualmente la estimación de la producción Nacional de café con mediciones directas en campo, a partir de un muestreo destructivo sobre una muestra de 60 árboles por hectárea, en un área de 2.000 ha, sobre las 900.000 ha sembradas en café, logrando estimaciones con un 5% de error. Este muestreo destructivo se realiza dos veces por año y requiere extraer y pesar todos los frutos de café presentes en los árboles, lo que conlleva un considerable esfuerzo y coste. Esto se realiza de esta manera ya que no existen métodos no destructivos de estimación o herramientas costo-eficientes que permitan identificar la producción del cultivo y programar labores agrícolas. Esta información permitiría manejar los recursos de manera más eficiente, determinar con precisión las necesidades de mano de obra para la recolección, prever los insumos para el proceso de poscosecha y pactar una negociación anticipada de su producción.

La visión artificial es una tecnología ampliamente utilizada en agricultura (Cubero et al., 2011). Por ello, este trabajo propone una metodología para medir la producción de café en rama de manera no destructiva, usando un dispositivo móvil y análisis de imágenes.

Generalidades de café

Un árbol de café de la variedad Castillo® alcanza alturas de 2,5 m y florece a partir del doceavo mes después de la siembra en cultivos tecnificados en la zona central cafetera (Figura 23). El tallo mide entre 7 y 8 cm de diámetro, cuenta en promedio con 40 ramas productivas. La maduración del café no se produce de manera homogénea (todos los frutos al mismo tiempo), en cada árbol, cada fruto evoluciona de forma diferente permitiendo la presencia de frutos con grados de madurez, dificultando la estimación de la producción. Durante el proceso de maduración del café se identifican cuatro etapas que comprenden entre 30 y 36 semanas dependiendo de la climatología (Salazar et al. 1993): la primera va desde la floración hasta la semana número siete, el crecimiento es lento, el color de los frutos es verde y aún no hay formación de la semilla. La segunda etapa comprendida entre las semanas 8 y 25 después de la floración, se caracteriza por un crecimiento rápido de los frutos tanto en tamaño como en peso fresco; a partir de la semana 18 comienza la formación de la semilla hasta que completa su desarrollo. En la tercera etapa, semanas 26 a 32, tiene lugar la maduración, el fruto se encuentra fisiológicamente desarrollado. Finalmente, la cuarta etapa se presenta después de la semana 32 y se caracteriza porque el fruto se sobremadura y se seca (Salazar et al. 1994). En general, durante estas etapas se presentan cambios físicos y químicos que se han estudiado para conocer su incidencia en la calidad de la bebida (Marín et al. 2003, Ramos et al. 2010, Sanz et al. 2008, Aristizábal et al. 2012). En estos estudios, se ha demostrado que características como el color, tamaño, peso, entre otros, logran diferenciar los frutos por su desarrollo (Figura 24).

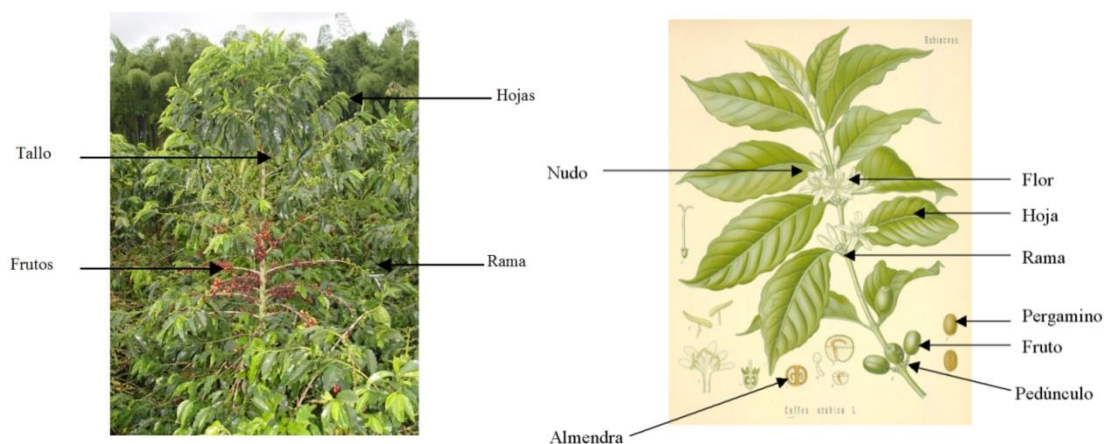


Figura 23. Árbol de café Variedad Castillo®, Cardona 2006 y Estructuras vegetativas de una rama de café, Köhler 1887.

Como se puede observar en la Figura 24, el proceso de maduración se relaciona directamente con el cambio de color del fruto de café. Este cambio va desde el color verde hasta el rojo intenso, pasando por tonalidades amarillas y naranjas. En la fase de postmaduración el fruto tiene tonalidades violeta o negras. La oferta de frutos en una rama puede ser variable e incluir múltiples estados de desarrollo durante todo el año, sin embargo, deben ser cosechados solo aquellos maduros y sobremaduros, los pintones o

semimaduros (con madurez fisiológica de color anaranjado) y verdes (inmaduros) deben esperar otro pase (momento) de recolección, presentándose cerca de 18 pases por año.

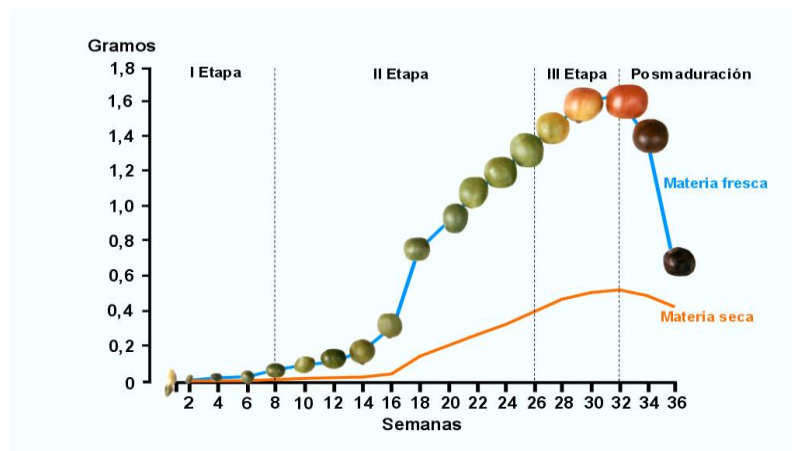


Figura 24. Desarrollo de los frutos de café después de la floración, (fuente: FEDECAFÉ).

El objetivo de este trabajo es construir un modelo para determinar la producción de una rama de café a partir del conteo de frutos en cada estado de maduración en una sola vista de la rama, utilizando imágenes adquiridas mediante dispositivos móviles. Para ello se han desarrollado algoritmos de análisis de imágenes que permiten diferenciar los distintos estados de maduración de los frutos del café en la rama.

Material y Métodos

El experimento se llevó a cabo durante los meses de diciembre de 2013 y abril de 2014 en 69 ramas seleccionadas de café de la variedad Castillo®. Cada rama contenía frutos en cuatro estados de desarrollo: inmaduro (Etapa II), pintón (inicio - Etapa III), maduro (final – Etapa III) y sobremaduro (Etapa IV), de acuerdo con lo descrito en la Figura 2. Las ramas se obtuvieron de árboles de café de segunda y tercera cosecha, sembrados en la Estación Central Naranjal de Cenicafe ubicada en Chinchiná, Caldas (Colombia), específicamente en 4°58'N, 75°39'W a 1381 m de altitud sobre el nivel del mar.

Se adquirieron imágenes con un tamaño de 3264 x 2448 píxeles con una cámara integrada en un dispositivo móvil, Samsung S5 SM-G900M, dispuesta entre 8 y 15 centímetros de la rama. Las imágenes se adquirieron en el campo con dos condiciones de iluminación: soleado y nublado. El fondo de las imágenes estaba conformado por suelo, malas hierbas y hojas secas. Debido a la longitud de las ramas (entre 40 y 60 cm), se capturaron varias imágenes a lo largo de cada rama, obteniendo un total de 280 imágenes para las 69 ramas. Imágenes pertenecientes a la misma rama se combinaron para dar un resultado único por rama. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de las imágenes adquiridas a una rama de café.



Figura 25. Conjunto de imágenes para una rama de café.

Una vez tomadas las imágenes se extrajeron, contaron, pesaron y clasificaron los frutos década rama para cada estado de desarrollo (maduro, semimaduro e inmaduro). La clasificación manual de referencia se realizó por un panel de expertos. Para la medición del peso se utilizó una balanza de precisión (PB8001-S, Mettler Toledo, Greifensee, Suiza), con resolución 0,1g.

Las ramas utilizadas en este trabajo tenían un porcentaje de maduración entre el 10% y el 70%, como se muestra en la distribución de frutos maduros de la Figura 26, que muestra la proporción de los distintos estados de desarrollo. Se observa la escasa presencia de frutos semimaduros y la predominancia de frutos inmaduros en las ramas utilizadas. En este trabajo se ha creado una herramienta para determinar la proporción de frutos maduros presentes en las ramas evaluadas, con el objetivo de que esta información se pueda utilizar en la programación de labores de recolección.

Análisis de imágenes

Se utilizaron diez imágenes (tres ramas) tomadas en diferentes condiciones de iluminación para crear el modelo de segmentación mediante la aplicación Food-ColorInspector (disponible en <http://www.cofilab.com>). Esta aplicación permite crear un modelo de clasificación de píxeles basado en análisis discriminante lineal a partir de las coordenadas de color de una selección manual de píxeles pertenecientes a diferentes regiones de interés (clases). Estas regiones de interés correspondieron a fondo, frutos inmaduros, semimaduros y maduros, Figura 27

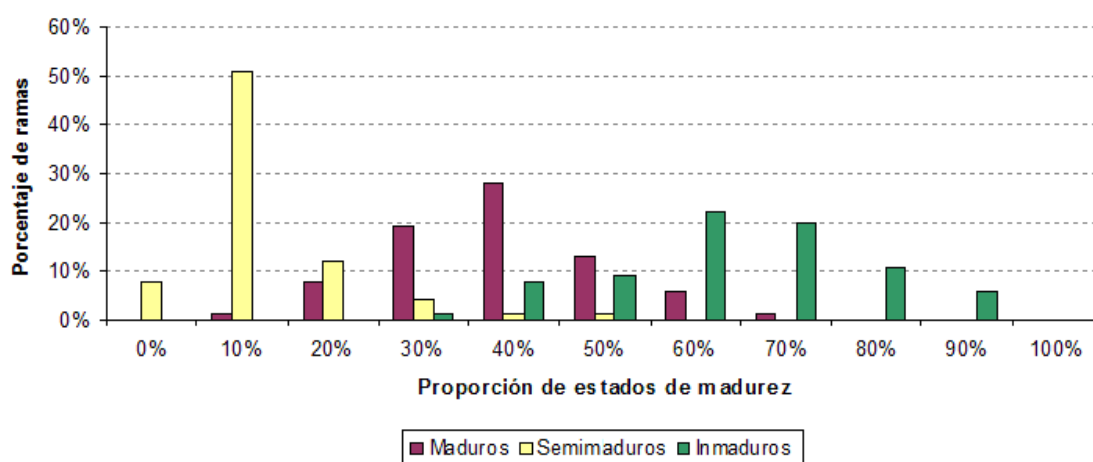


Figura 26. Proporción de frutos por estado de desarrollo, maduro, semimaduro e inmaduro en las ramas utilizadas.

El modelo de segmentación se aplicó segmentar el resto de las imágenes obteniendo para cada imagen el número de objetos de cada clase y el área cada objeto encontrado. Las características de interés, en este caso, fueron áreas de los objetos clasificados como frutos maduros, semimaduros e inmaduros. Para cada objeto encontrado en la imagen se calculó su área y se realizó un filtrado para eliminar los objetos de pequeño tamaño que se consideraron ruido.



Figura 27. Procesamiento de imágenes, segmentación, filtrado de tamaño, analizador de objetos y contornos.

Para el conjunto de imágenes de una rama se obtuvo el área total de los objetos pertenecientes a las clases maduros, semimaduros e inmaduros. Se determinó el porcentaje de maduración (PM) como la relación entre el sumatorio del área perteneciente a todos objetos maduros y la suma de las áreas de todos los objetos pertenecientes a las tres clases (Ecuación 2).

$$PMI_r = \frac{\sum_r A_{md_i}}{\sum_r A_{md_i} + \sum_r A_{sm_i} + \sum_r A_{in_i}} \quad (2)$$

donde PMI_r es el porcentaje de maduración estimado mediante análisis de imagen para la rama r , y A_{md_i} , A_{sm_i} y A_{in_i} es el área de los objetos de cada clase encontrados en la imagen i perteneciente a la rama r , respectivamente.

Construcción y validación del modelo de estimación

Como referencia se empleó el porcentaje de frutos maduros medidos de forma manual calculado como la relación entre el número de frutos maduros y la totalidad de frutos presente en la rama, como se expresa en la Ecuación 3.

$$PMR_r = \frac{\sum_r F_{md}}{\sum_r F_{md} + \sum_r F_{sm} + \sum_r F_{in}} \quad (3)$$

donde PMR_r es el porcentaje de frutos maduros estimado de forma manual para la rama r , y F_{md_i} , F_{sm_i} y F_{in_i} es el número de frutos maduros, semimaduros e inmaduros de la rama r .

Se obtuvo un modelo de regresión lineal entre las variables PMI y PMR utilizando 23 ramas escogidas de manera aleatoria. Se identificó la expresión lineal que relaciona ambas variables y se estimó el coeficiente de determinación del modelo y el error de estimación para estas 23 ramas. Posteriormente el modelo se validó aplicándolo a las 46 ramas restantes.

Resultados y Discusión

La Figura 28 muestra la recta de regresión obtenida para las ramas de entrenamiento considerando como variable independiente *PMI* y variable dependiente *PMR*. El modelo matemático descrito en la Ecuación 4 determina como variable a calcular porcentaje de maduración estimada (*PME*).

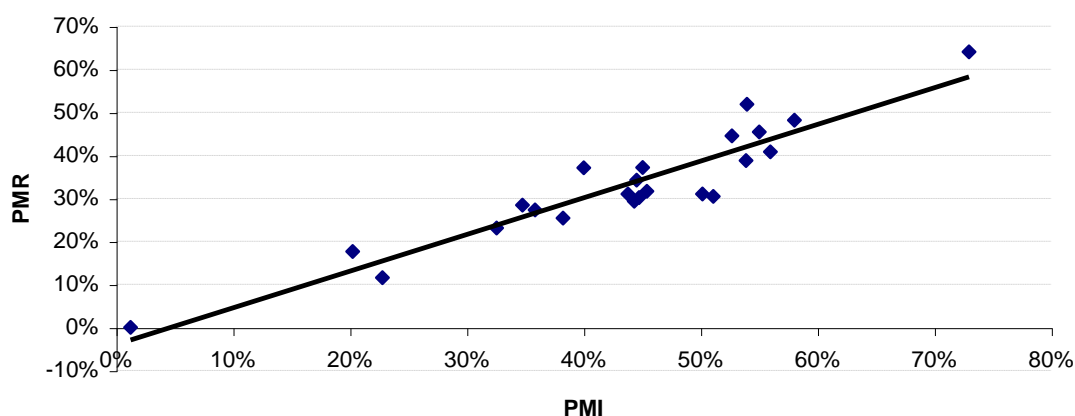


Figura 28. Diagrama de dispersión y línea de tendencia para *PMR* y *PMI*.

$$PME_r = 0,853 \cdot PMI_r - 0,04 \quad (4)$$

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explicó el 87,82% de la variabilidad en *PMR*. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue de 0,94, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables *PMR* y *PMI*. El error absoluto medio obtenido como el valor promedio de los residuos fue de 3,9%.

Para la validación del modelo se aplicó la Ecuación 4 a los valores *PMI* y se comparó el resultado obtenido con el valor *PMR* medido, considerando el error como la diferencia entre *PMR* y *PME*, ecuación 5 y Figura 29.

$$err = PMR - PME \quad (5)$$

En la validación del modelo se obtuvo un $R^2=75\%$ y un error absoluto medio del 5,5%, Figura 29.

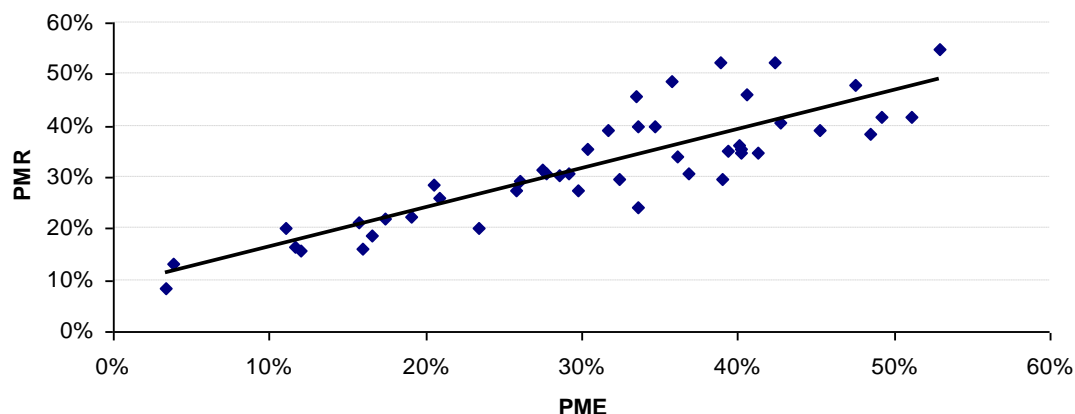


Figura 29. Diagrama de dispersión para PME vs. PMR.

Los resultados obtenidos son prometedores para el desarrollo de herramientas que permitan agilizar la estimación manual de cosecha del café utilizando dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes, al alcance del caficultor. Aunque en este trabajo las imágenes se analizaron en un ordenador personal, la adquisición, que es uno de los puntos más importantes y críticos del proceso, se realizó con un dispositivo móvil en condiciones de campo lo que permite pensar en una aplicación real para la caficultura colombiana. No obstante, en este momento se está trabajando en el desarrollo de una aplicación para el procesamiento de imágenes en el propio dispositivo móvil para, de esta forma, poner al alcance del caficultor algunas tecnologías rápidas, objetivas y no destructivas que apoyen la programación de labores agrícolas como la recolección.

El porcentaje de maduración de las muestras utilizadas, tanto para el entrenamiento como para la validación, representa la distribución típica de la producción para la zona central cafetera en Colombia. Por esta razón, el modelo puede funcionar en óptimas condiciones para esta región mientras que para validar el método en otras regiones, sería necesario realizar nuevamente una calibración y ajuste del modelo. Los ensayos se han realizado con ramas extraídas de los árboles y llevadas a un entorno donde se asemeje su posición y el fondo real, por lo que es necesario un siguiente paso para replicar la metodología en un árbol completo.

Como principales limitaciones del método y fuentes de error se han encontrado una confusión entre píxeles correspondientes a hojas o tallos y píxeles correspondientes a frutos inmaduros, así como una confusión entre píxeles pertenecientes a tallos secos con píxeles pertenecientes a frutos semimaduros. Por este motivo es importante continuar la investigación en métodos basados en el análisis geométrico de las regiones de interés, capaces de separar de una forma aun más eficaz estas clases que presentan colores similares.

Conclusiones

Se ha creado un método para distinguir frutos en distintos estados de maduración a través del análisis de imágenes adquiridas con un dispositivo móvil. Las correlaciones halladas entre el método manual y el método no destructivo desarrollado son relativamente altas. Este trabajo sienta las bases para la estimación de la producción en ramas de café de manera no destructiva mediante análisis de imágenes adquiridas con

dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes, en condiciones de campo, sin ningún tipo de procesamiento adicional para mejorar las condiciones de las imágenes adquiridas.

Agradecimientos

Los autores expresan especiales agradecimientos al Centro Nacional de Investigaciones de Café Cenicafé de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Bibliografía

- Arcila, J., Farfán, F., Moreno, A., Salazar, L.F., Hincapié, E. 2007. Sistemas de Producción de café en Colombia. Ed. FNC-Cenicafé, Manizales (Caldas), Colombia.
- Aristizábal, I.D., Carvajal, J.J., Oliveros, C.E. 2012. Physical and mechanical properties correlation of coffee fruit (*Coffea arabica*) during its ripening. *Dyna* 79, 148–155.
- Cardona J.A. 2006. Diseño de una máquina portátil para la cosecha asistida de café. Trabajo de Pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Cilas, Ch., Descroix, F. 2004. Yield Estimation and Harvest Period. En *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. Wintgens, J.N. (editor). Ed. Wiley-VCH, Weinheim, Alemania.
- Cubero, S., Aleixos, N., Moltó, E., Gómez-Sanchis, J., Blasco, J. 2011. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology* 4, 487-504.
- Koheler, H.A. 1887. Köhler's Medizinal-Pflanzen. Ed Franz Eugen Köhler, Gera, Alemania.
- Marín, S., Arcila, J., Montoya, E., Oliveros, C. 2003. Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia). *Revista Cenicafé* 54, 208–225.
- Martínez, V.C. 2006. Archivos de Economía: Pronósticos de producción agrícola. República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación, Dirección de Estudios Económicos. Doc. 305. Disponible en <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Econmicos/305.pdf>. Último acceso Abril 2015.
- Ramos, P.J., Sanz, J., Oliveros, C. 2010. Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Revista Cenicafé* 61, 315–326
- Rendón S., J.R., Arcila, J. and Montoya, E.C. 2008. Estimación de la producción de café con base en los registros de floración. *Revista Cenicafé* 59, 238–259.
- Salazar, M.R., Arcila, J., Riaño, N.M., Bustillo, A.E. 1993. Crecimiento y desarrollo del fruto del café y su relación con la broca. *Avances Técnicos Cenicafé* 194, 1-4.
- Salazar G., M. R., Chaves, B., Riaño, N.M., Arcila, J. Jaramillo, A. 1994 Crecimiento del fruto de café *Coffea arabica* var. Colombia. *Revista Cenicafé* 45, 41–50.
- Sanz, J.R., Ramos, P.J., Oliveros, C.E. 2008. Algorithm to identify maturation stages of coffee fruits. *IAENG, Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS'08 (I)*, 167–174.
- Upreti, G., Bittenbender, H.C., Ingamells, J.L. 1991. Rapid estimation of coffee yield. In *Proc. of Quatorzieme colloque scientifique international sur le café*. San Francisco, 14-19 Julio 1991, pp. 585-593.